

A ciklikus hőmérsékleti igénybevételek hatása a PET palackzsugorító élettartamára

Lakner József, Györök György
Regionális Oktatási és Innovációs Központ
Budapesti Műszaki Főiskola
Budai út 45, H-8000 Székesfehérvár
Email: lakner.jozsef@bmf.roik.hu
Email: gyorok.gyorgy@bmf.roik.hu

Kivonat—Egy automatikus készülék polietilén (PET) palackok méret csökkentő zsugorítását végzi az „emlékező” műanyagokra jellemző melegítéses technológia felhasználásával. A készülékben a palackot egy emelő szerkezet a 800-1300°C hőmérsékletű kazán belsejébe nyomja, majd a műanyagot redőszerűen összepréseli, összezugorítja. A kazánnal kapcsolatos vizsgálódásunknak két fő célja volt. Egyrészt a fűtőtest elhasználódottságának (a működések számának, üzemidőnek) és az villamos ellenállás összefüggésének meghatározása. Ennek praktikus oka az esetleges vevői reklamációk jogosságának alátámasztása ellenállásméréssel. A méréseink másik célja, hogy olyan vezérlési eljárást ajánljunk, amely az adott kazán meghatározott körülmények között történő működésénél a leghosszabb várható élettartamot jelenti.

I. BEVEZETÉS

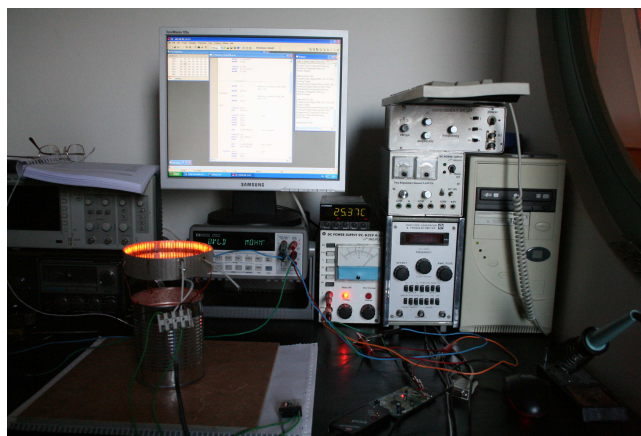
A méréshez kialakított környezet, illetve a vizsgált eszköz az 1. és 2. ábrán láthatók. A folyamatos méréshez 40s-os kikapcsolási és 20s-os bekapcsolási időt alakítottunk ki egy programozott mikroprocesszoros vezérlő segítségével. Az ellenállásmérés logaritmikusan változó ciklusok után történt, 10, 20, 50, 100...stb. értékeknél, szobahőmérsékletre hűtött fűtőellenállás-teszten.

Annak tényleges működési körülményeit perces ciklusidővel, ezen belül 20 másodperces felfűtéssel szimuláltuk, melynek során élettartama mintegy 10.000 ciklusnak adódott, amely mintegy 55 óra izoterm hőterhelésnek felel meg, ez nagyságrendekkel kisebb, mint ciklusok nélkül mért élettartam. A hőmérsékleti ciklusok hatásának értelmezésére folyamatosan mértük mindkét esetben az ellenállást, és azok összehasonlításából következtetéseket vontunk le a ciklikus hőmérsékletváltozás során végbemenő folyamatokra és ezáltal a tönkremenetel okára [5].

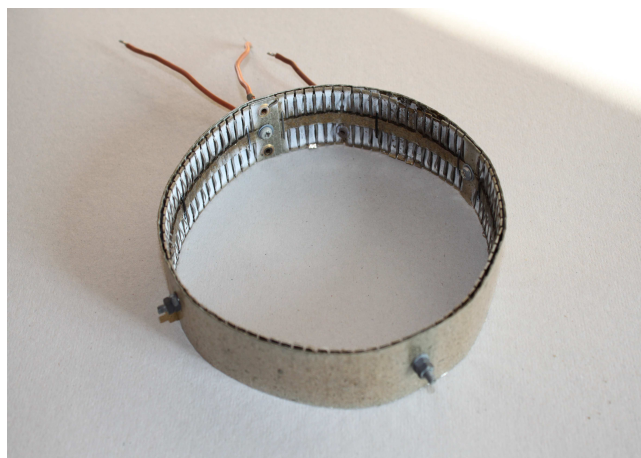
II. A MÉRÉSI EREDMÉNYE

A fűtőtest ellenállásának (R) változása a ciklikus hőterhelés hatására a 3. ábrán látható. Az ellenállás kezdeti jelentős ingadozásokkal, mintegy ezer ciklusig csökkent, utána közelítőleg lineárisan növekedett. A mérést 10.000 ciklus után befejeztük, a gyakorlatban ez a fűtőbetétek várható élettartama [1].

A fűtőtest ellenállásának változása az izoterm hőterhelés (folyamatos fűtés) hatására a 4. ábrán látható. Az ellenállás mintegy 5 óra időtartamig gyorsan csökkent, ezt követően



1. ábra. A mérési elrendezés a bekapcsolt fűtőtesttel

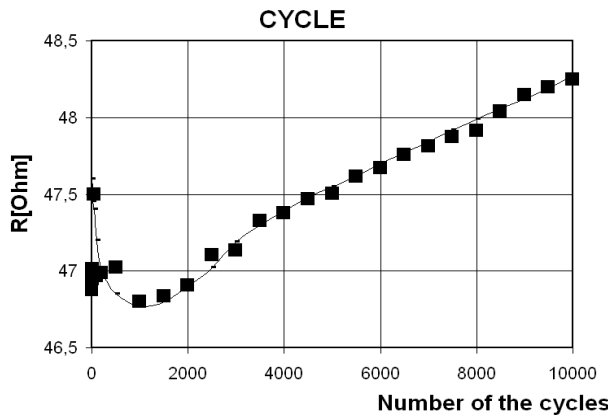


2. ábra. A vizsgált fűtőtest

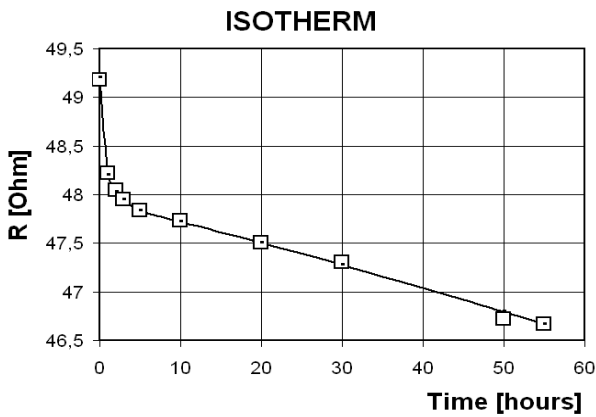
tovább csökkent, de a csökkenés sebessége jóval kisebb és a tönkremenetelnél megfelelő izoterm hőterhelésig (55 óra) állandó volt. Továbbá, ellentétben a ciklikus terheléssel, a kezdeti ingadozások gyakorlatilag nem jelentek meg.

III. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A ciklikus hőterhelésnél az ellenállás kezdeti ingadozása elsősorban a fűtőszál és a kivezetések közötti kontaktusok



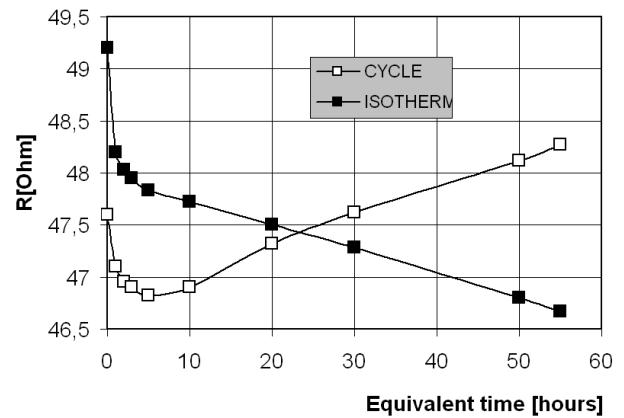
3. ábra. A PET fűtőtest ellenállásának változása a ciklusok számának a függvényében. A szimbólumok a mért értékek, a kihúzott vonal az ingadozások eliminálásával kapott értékek



4. ábra. A PET fűtőtest ellenállásának változása az izoterm hőterhelés a függvényében. A szimbólumok a mért értékek, a kihúzott vonala valószínű értékek

változásának a következménye lehet. Ugyanis a fűtőszál méretei, az ismételt felfűtések és lehűlések hatására, megváltoznak, ami a kontaktusoknál egymást követő kismértékű képlékeny alakváltozásként jelentkezhet. Ezek, az egymást követő alakváltozások, változtathatják a felületek között illeszkedéseket és ezen keresztül az átmeneti ellenállást, így a fűtőtest ellenállását is. Adott ciklusszám után a kontaktus „összeheged”, már tovább nem változik. Eliminálva a kontaktusváltozásokból származó ellenállás változást, az így kapott ellenállás mintegy 1000 ciklusig csökken, majd ezt követően nő (3. ábra).

Az izoterm mintában az első 5 órában gyorsan csökken az ellenállás (4. ábra). Az ellenállás csökkenése a fűtőszál (húzott drót) alakított szerkezetének eltűnésével lehet kapcsolatban, amely során eltűnnek a diszlokációk, részben elbomolhat a szilárd oldat, egy megújult, részben újrakristályosodott szerkezet jön létre, ahol mindegyik folyamat, így eredőjük is, ellenállás csökkenést eredményez [2]. Az ellenállás csökkenése



5. ábra. A ciklikus és az izoterm hőterhelésnek kitett minták ellenállásának a változása a ciklusok számának a függvényében.

5 óra után tovább folytatódik. Mivel a fűtőszál ellenállásának jelentős részét a szilárd oldatban lévő c összkonzentrációjú ötvözők ellenállás járuléka (R_c az egységnyi koncentrációjú szilárd oldat ellenállás járuléka) adja, amely a Matthiesen-szabály felhasználásával

$$R = R_M + R_c c, \quad (1)$$

így annak csökkenése a szilárd oldat bomlásával lehet kapcsolatban. A folyamat diffúzióval megy végbe, amelynek sebessége

$$-\frac{dc}{dt} = D \cdot \text{grad} c \cong D \frac{\Delta c}{\lambda}, \quad (2)$$

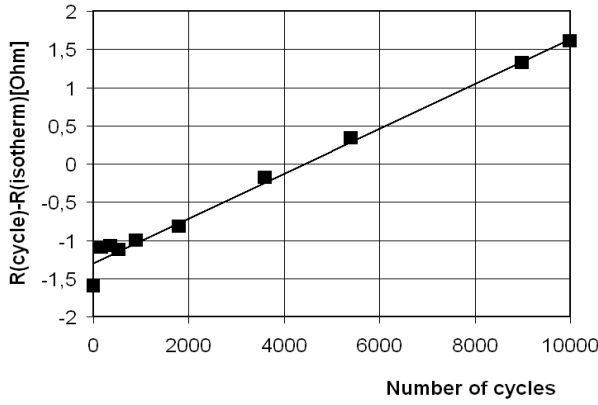
ahol D a diffúziós állandó (függ a hőmérséklettől), a λ az átlagos diffúziós távolság, a Δc a koncentrációkülönbség a diffúziós távolságon belül [3].

Mivel a folyamat meglehetősen lassú (50 óra alatt az ellenállás mintegy 2%-ot változott, ennél fogva a szilárd oldatnak is csak néhány %-a bomlott el), így hosszútávú diffúzió lehet mögötte, ami azt jelenti, hogy $\lambda \gg 0$, vagyis a kiválások a szemcsehatárokon, $\lambda \cong \text{szemcseátmérő}/4$, esetleg a felületen, $\lambda \cong \text{huzalátmérő}/4$, (ebben az esetben beleértve az oxidációt, illetve a párolgást is) jönnek létre. Mivel a koncentráció keveset változik, $c \cong c_0$, ahol c_0 a kezdeti koncentráció, így a Δc koncentráció különbség is megegyezik a kezdetivel, $\Delta c \cong \Delta c_0$, melynek következtében a folyamat sebessége a (2) alapján közelítőleg állandó. Ennek megfelelően az ellenállás, mint az idő függvénye a (1) és a (2) összevetéséből

$$R = R_0 - \alpha t, \quad (3)$$

ahol $R_0 = R_c c_0$ és $\alpha = \frac{\Delta c}{\lambda}$ egyenest ad (4. ábra).

Annak érdekében, hogy összehasonlítsuk a ciklikus és az izoterm hőterhelést kapott mintákat, kiszámoltuk az adott



6. ábra. A ciklikus és az izoterm hőterhelésnek kitett minták ellenállás különbségének változása az egyenértékű hőterhelési idő függvényében

ciklusszámhoz tartozó egyenértékű izoterm hőterhelési időt, amely (órában)

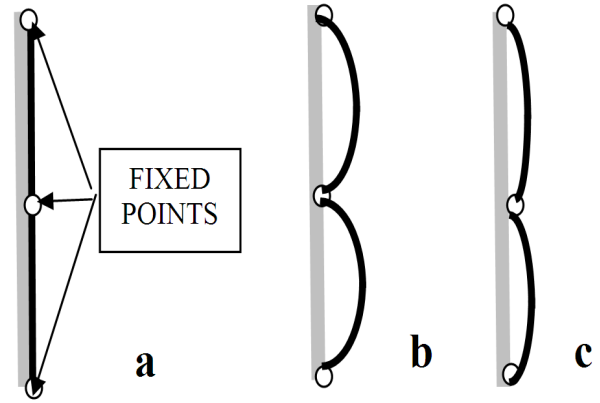
$$t_{eq} = \frac{1}{180}n, \quad (4)$$

ahol n a ciklusszám. Az így definiált egyenértékű hőkezelési idő függvényében ábrázoltuk az ellenállás változást (5. ábra), amely mindkét mintánál, mintegy 5 órás izoterm hőkezelésnek megfelelő ideig, azonos módon csökkent, majd ezt követően a ciklikusnál nőtt, míg az izotermnél tovább csökkent.

A ciklikus mintánál az ellenállás csökkenése 5 óra után növekedésbe ment át. Mivel ennél a mintánál is lejátszódnak a fent említett folyamatok, a növekedés a ciklikusság következménye. Ennek leválasztására ábrázoltuk a két minta ellenállás változásai közötti különbséget (6. ábra), amely az egyenértékű hőterhelési idővel, azaz a ciklusszámmal arányosan nőtt (a nullponti különbség a két minta ellenállása közötti különbségből fakad). Mivel a ciklikus hőterhelés során a izotermhez képest újabb ellenállás változást eredményező folyamatok nem játszódnak le, így az ellenállás növekedés a fűtőszál geometriája megváltozásának (megnyúlásának) a következménye lehet.

A fűtőtest geometriai kiképzése olyan, hogy a fűtőfelületi oldalon a fűtőszál menetenként három pontban van rögzítve egy szigetelő gyűrűhöz (7.a. ábra). A felfűtés alatt a hőtágulási együtthatók különbözősége következtében a fűtőszál felpúposodik (7.b. ábra), melynek során képlékeny alakváltozás (kúszás) is végbemegy, majd a fűtés kikapcsolása után, a lehűléskor összehúzódik, húzási feszültség ébred, melynek hatására az megnyúlik [1]. Ennek eredményeképpen a ciklus végére a fűtőszál hossza megnő, $l_i = l_{i-1} + \Delta l_i$ (7.c. ábra), a keresztmetszete lecsökken, $q_i = l_{i-1} - 2\Delta l_i$, amelyek következtében ellenállása megnő, nevezetesen

$$\Delta R = R_i - R_{i-1} \cong R_{i-1} \frac{3\Delta l_i}{l_i}. \quad (5)$$



7. ábra. A fűtőszál egy ciklus alatti megnyúlásának sematikus képe.

A folyamat ciklusról ciklusra ismétlődik, a megnyúlások és ennek eredményeképpen az ellenállás változások összeadódnak. Amennyiben a megnyúlások ciklusonként közel azonosak, $\Delta l_i \cong \Delta l$, továbbá $\Delta l_i \ll l$, ebben az esetben $l_i \cong l$ és $R_i \cong R_0$, így az ellenállás különbség az n -edik ciklus után

$$\Delta R_n = \sum_{i=1}^n R_{i-1} \frac{3\Delta l_i}{l_i} \cong \beta n, \quad (6)$$

ahol $\beta = R_0 \frac{\Delta l}{l}$ a ciklusonkénti ellenállás járulék. A (6) összefüggésnek megfelelően az ellenállás különbség, a $\Delta R_n = R(\text{cycle}) - R(\text{isotherm})$ ciklusszám (egyenértékű hőterhelési idő) függvényében egyenest ad (6. ábra).

A ciklikus igénybevétel hatására a fűtőszál anyaga kifárad, és egy adott ciklusszámnál (n_{MAX}) eltörik (kifáradási törés). A törés mechanizmusa az, hogy az anyagban meglévő, ún. repedési kezdemények, a ciklikus feszültség hatására elkezdnek növekedni és mikor átérjük az egész keresztmetszetet, a huzal eltörik [4]. Esetünkben a tönkremenetelt gyorsítja, hogy a repedés miatt lecsökkent keresztmetszetenél megnő az ellenállás, ezáltal a hőmérséklet is, ennek következtében az anyag lokálisan megolvadhat. A repedés kezdemények az ún. hármas szemcsehatároknál alakulhatnak ki, ezért a kifáradási törés, így az élettartam is megújult-újrakristályosodott szerkezet függvénye, amely a lágyítás hőmérséklet paramétereivel befolyásolható [4]. Ezen utóbbiak esetünkben egy spontán lágyulási folyamat paraméterei, amely az első 1000 ciklus alatt megy végbe.

IV. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

A PET fűtőszál tönkremenetele a ciklikus hőterhelés során végbemenő ciklikus mechanikai terhelés okozta kifáradási törés. Ezért az élettartam meghosszabbítására az alábbi lehetőségek kínálkoztak:

- 1) Jobb kifáradási jellemzőkkel rendelkező huzalanyag kiválasztása (pl. Nikrokantal) [1].

- 2) A kifáradási jellemzők javítása a huzal hőkezelésével (felhasználás előtti lágyításával).
- 3) A ciklusszám csökkentése, a kikapcsolás késleltetésével, azaz az egymás után bedobott palackok között a fűtőtest ne kapcsoljon ki.

A 2. pont fejlesztőmunkát kíván, míg a 3. vezérléssel megoldható.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Handbook. KANTHAL Appliance Heating Alloys Copyright by Kanthal AB, Catalogue 1-A-2-3 02. 97 5000.
- [2] Cahn, R. W. Recovery and Recrystallization, Physical Metallurgy. (Fourth Edition), 1996, p. 2399-2500.
- [3] Doherty, R. D. Diffusive Phase Transformations in the Solid State, Physical Metallurgy. (Fourth Edition), 1996, p. 1363-1505.
- [4] Thomson, R. M. Fracture, Physical Metallurgy. (Fourth Edition), 1996, p. 2207-2292.
- [5] Gy. Györök, L. Simon Programozható analóg áramkör megszakításos alkalmazása mikrovezérlő környezetben. *Alkalmazott informatika és határterületei Szimpózium, A Budapesti Műszaki Főiskola Regionális Oktatási és Innovációs Központ, 2009. november 6. Székesfehérvár, ISBN ISBN 978-963-7154-94-2.*